

## Оценка влияния нетрадиционных мелиорантов на накопление радионуклидов в растениях

Н.К. Бахтина, Д. А. Дмитриев  
ФГБОУ ВПО МарГТУ, Йошкар-Ола

Радиационные аварии и катастрофы, испытания ядерного оружия и промышленные ядерные взрывы привели к радиоактивному загрязнению обширных территорий. Так, в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС, только в Российской Федерации в настоящее время загрязнено свыше 59 тыс. км<sup>2</sup>, в том числе 15 тыс. км<sup>2</sup> лесных и около 20 тыс. км<sup>2</sup> сельскохозяйственных угодий [1].

Аккумуляция радионуклидов растениями из почвы определяет исходные масштабы включения радионуклидов в пищевые цепи: почва – растения (лесные и сельскохозяйственные) – животные (дикие и сельскохозяйственные) и/или человек [2]. Что делает проблему радиационного загрязнения весьма актуальной.

Факторы, от которых зависит подвижность радионуклидов в почве и связанная с ней интенсивность их миграции в растения в природных условиях, можно разделить на несколько групп: свойства радионуклидов, свойства почвы и растений, погодноклиматические условия произрастания растений и агромелиоративные мероприятия.

В числе факторов, влияющих на миграцию радионуклидов из почвы в растительность, следует отметить действие минеральных и органических удобрений. Как правило, их систематическое применение приводит к снижению перехода излучателей в сельскохозяйственную продукцию [3]. Выделены три фактора, объясняющих это явление [4,5]

- увеличение биомассы при улучшении минерального питания – эффект разбавления;
- повышение концентрации в почве обменных катионов калия и кальция, усиливающих антагонизм с радионуклидами при корневом их усвоении;
- изменение доступности радионуклидов для корневых систем в результате перевода их в труднодоступные соединения и обменной фиксации в результате реакций с внесенными удобрениями.

В литературе имеется достаточно сведений о влиянии минеральных и традиционных органических удобрений на накопление техногенных радионуклидов в растениях. Поэтому целью нашего исследования было оценить влияние нетрадиционных мелиорантов на миграцию радионуклидов в системе «почва - растение».

Нетрадиционные органические удобрения были получены в результате компостирования смеси осадков сточных вод ОСК г. Йошкар-Олы и хвойно-лиственного опила с деревоперерабатывающего пункта Учебно-опытного лесхоза МарГТУ в буртах (в течение 3-х лет – далее НОУ), аэробного компостирования в биореакторе непрерывного действия, разработанном сотрудниками МарГТУ, в двух режимах в течение 20 сут.: 1) температура водяной рубашки 65...70 °С, подача воздуха в тело компостируемой смеси 5...15 м<sup>3</sup>/сут в зависимости от температуры компостируемой смеси (далее УНОУ-1); 2) температура водяной рубашки поддерживалась на 10...15°С выше температуры компостной смеси, подача воздуха 15...60 м<sup>3</sup>/сут (далее УНОУ-2), а также компостирования в ящиках в течение 6 мес. (смеси УНОУ-1, УНОУ-2 с плодоовощными отходами и отработанным грибным субстратом – далее соответственно УНОУ-1+ПО, УНОУ-1+ОГС и УНОУ-2+ПО, УНОУ-2+ОГС). Так же для экспериментов был взят выдержанный гидролизный лигнин Суслонгерского ГДЗ (далее ВГЛ) и отработанный грибной субстрат (далее ОГС). Агрохимические свойства агрохимические свойства нетрадиционных мелиорантов приведены в таблице 1.

Действие мелиорантов связано как с эффектами «разбавления» (увеличения биомассы растений), так с процессами сорбции радионуклидов компонентами органических отходов (целлюлозы, лигнина и пектина) [6, 7].

Таблица 1 – Агрохимические свойства нетрадиционных мелиорантов

Мелиорант	Класс опасности	pH <sub>сол</sub>	Органическое вещество, %	Азот нитратн., %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	K <sub>2</sub> O, мг/кг
УНОУ - 1	III	6,38	77,9	0,2	2,3	102,1
УНОУ - 1+ ОГС	III	6,37	83,8	0,2	2,1	104,3
УНОУ - 1 + ПО	III	6,47	65,7	0,5	2,7	118,2
УНОУ - 2	IV	6,49	67,3	0,4	2,6	113,5
УНОУ - 2+ ОГС	IV	6,24	62,7	0,4	3,1	120,3
УНОУ – 2 + ПО	IV	6,36	77,3	0,8	2,9	115,3
НОУ	III	5,25	44,5	0,4	2,1	99,6
ОГС	V	6,10	59	0,5	2,6	112,0
ВГЛ	III	2,50-4,20	87-94	0,15-0,35	0,02-0,08	0,04-0,06

Для эксперимента использовалась дерново-слабоподзолистая песчаная почва на покровных суглинках, отобранная с естественной территории, загрязненной <sup>137</sup>Cs (Пензенская область Городищенский район). Выбор данной почвы для эксперимента обусловлен тем, что она имеет свойства наиболее «благоприятные» для подвижности радионуклидов в системе «почва-растение»: низкое содержание глинистых и илистых частиц, органического вещества, элементов питания, сильноокислая среда. Характеристика почвенных свойств приведена в таблице 2.

Таблица 2– Характеристика свойств дерново-слабоподзолистой песчаной почвы

Показатель	Значение
Гранулометрический состав, содержание фракций, %	
1,0-0,25 мм	44,55
0,25-0,05 мм	49,28
0,05-0,01 мм	1,70
0,01-0,005 мм	0,88
0,005-0,001 мм	0,78
<0,001 мм	2,83
<0,01 мм	4,48
Гигроскопическая вода, %	0,28
Агрохимические свойства	
pH <sub>солев</sub>	3,9
Гидролитическая кислотность, мг-экв/100 г почвы	3,6
Ca <sup>2+</sup>	1,11
Mg <sup>2+</sup>	0,10
Сумма обменных оснований	1,20
Степень насыщенности основаниями, %	25,40
Гумус, %	1,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> мг/100 г	4,7
K <sub>2</sub> O мг/100 г	9,1
Содержание радионуклидов	
<sup>137</sup> Cs валовая форма, Бк/кг	163,03±9,08
<sup>137</sup> Cs водорастворимая форма, Бк/кг	25,70±9,53 (15,8%)
<sup>137</sup> Cs ионообменная форма, Бк/кг	30,70±10,11 (18,8%)
<sup>90</sup> Sr валовая форма, Бк/кг	4,22±0,96
<sup>40</sup> K, Бк/кг	33,90±23,38
<sup>226</sup> Ra, Бк/кг	5,27±2,84
<sup>232</sup> Th, Бк/кг	не более 2,0

Для выявления радионуклидов в форме химических соединений с различной энергией связи с почвенными соединениями проводили последовательное выщелачивание

почвенных навесок различными экстрагентами (водорастворимая форма –  $\text{H}_2\text{O}$ , ионообменная – 1 н раствор  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) [8]. Определение валовой формы  $^{90}\text{Sr}$  проводилось радиохимическим методом [9], в ходе которого установлено, что валовое содержание  $^{90}\text{Sr}$  в почве составляет  $4,22 \pm 0,96$  Бк/кг, поэтому водорастворимая и ионообменная формы  $^{90}\text{Sr}$  не определялись.

Таким образом, доступные для растений формы радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  в исследуемой песчаной дерново-слабоподзолистой почве составляют 34,6 %, что согласуется с результатами других исследователей для данного типа почвы [10].

Для определения доз внесения и эффекта взаимодействия мелиорантов с почвой проводился модельный эксперимент. В качестве критериев выбора дозы внесения использовали изменение концентрации в водной суспензии почвы и мелиоранта обменных форм калия, как элемента-аналога  $^{137}\text{Cs}$ .

Для проведения модельного эксперимента использовали дерново-слабоподзолистую песчаную почву, в которую вносили мелиоранты в следующих концентрациях:

вариант 0 – мелиорант не вносился; вариант 4 – 0,25 г/г почвы;  
вариант 1 – 0,00125 г/г почвы; вариант 5 – 0,5 г/г почвы;  
вариант 2 – 0,025 г/г почвы; вариант 6 – чистый мелиорант.  
вариант 3 – 0,05 г/г почвы;

Эксперимент проводился в трехкратной повторности.

Почвенная навеска с мелиорантом заливалась ацетатом аммония. Суспензия выдерживалась 24 часа, после чего растворы отфильтровывали, атомно-абсорбционным методом определяли в растворе количество подвижного калия и кальция, результаты пересчитывали на содержание ионообменных форм в субстрате.

Результаты эксперимента в таблице 3 и на рисунках 1 и 2.

Таблица 3 – Содержание обменных форм калия в компонентах субстрата, мг/кг

Мелиорант	Доза внесения мелиоранта, г/г почвы						
	0 (почва)	0,00125	0,025	0,05	0,25	0,5	мелиорант
НОУ	91,02	43,39	55,52	72,48	98,48	278,00	517,59
ВГЛ	91,02	91,71	54,64	61,95	42,31	137,57	152,24
ПО	91,02	219,73	701,20	1048,23	2170,60	9384,63	3367,07
ОГС	91,02	120,93	120,77	179,33	281,53	892,40	2261,55

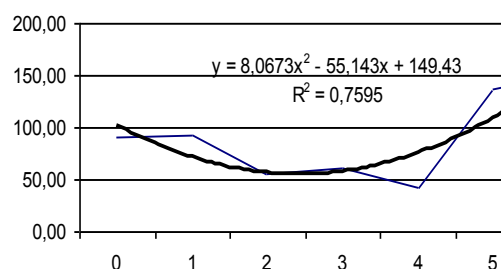
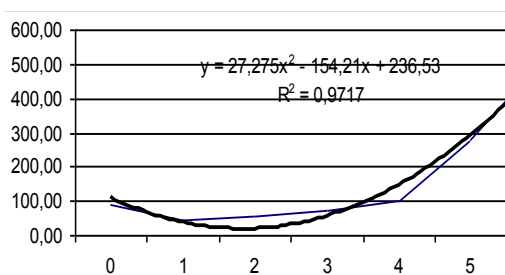


Рисунок 1 - Зависимость концентрации обменного калия (мг/кг субстрата) от дозы внесения НОУ (слева) и выдержанного гидролизного лигнина (справа)

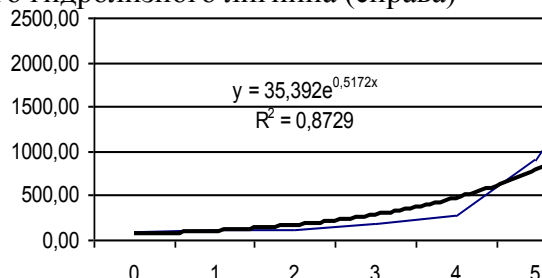
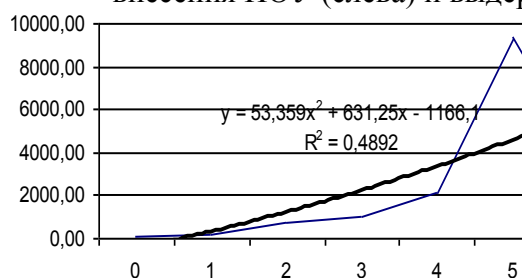


Рисунок 2 – Зависимость концентрации обменного калия (мг/кг субстрата) от дозы внесения плодовоовощных отходов (слева) и отработанного грибного субстрата (справа)

По сравнению с исходным содержанием калия в почве и чистом мелиоранте эффект снижения в результате взаимодействия почвы и мелиоранта наблюдается при минимальных дозах внесения (0,00125-0,025 г/г почвы) НОУ. При максимальных концентрациях происходит увеличение содержания обменного калия за счет привноса с мелиорантом.

У гидролизного лигнина максимум эффекта сдвинут в средние концентрации (0,05-0,25 г/г почвы).

Увеличение дозы отработанного грибного субстрата и плодовоовощных отходов увеличивает количество обменного калия за счет привноса с мелиорантом.

Таким образом, следует ожидать два эффекта от применения рассматриваемых мелиорантов – сорбцию калия и, соответственно, цезия при минимальных дозах мелиорантов (что экономически целесообразно), а также повышение конкуренции ионов калия при поглощении растениями с увеличением дозы внесения мелиорантов (что не целесообразно с экономической и токсикологической точки зрения).

Для оценки возможной токсичности почв, модифицированных нетрадиционными мелиорантами, использовался фитотест. Уровень загрязнения почв оценивался в соответствии с разработанной шкалой токсичности почв по результатам определения всхожести семян пшеницы и угнетения корней растения на ранних стадиях их развития. При превышении длины корней растений, выращиваемых в испытываемой почве, над контрольным вариантом считается, что почва обладает стимулирующими свойствами.

Таблица 4 - Биотестирование почв, модифицированных мелиорантами, с использованием пшеницы

Наименование мелиоранта	Контролируемые параметры						Степень токсичности почвы
	Кол-во проросших семян, шт	N <sub>1</sub>	Сте-пень токсичности (1)	Длина корня, мм	N <sub>2</sub>	Степень токсичности (2)	
Контроль	20,0	-	-	86,5	-	-	-
НОУ	19,7	1,5	5	100,0	-33,6	5	5
УНОУ-1	15,0	25,0	4	24,5	71,79	3	3
УНОУ-2	19,7	1,5	5	79	8,67	5	5
УНОУ-2+ ПО	19,7	1,5	5	98	-13,3	5	5
УНОУ-2 + ОГС	19,7	1,5	5	54	37,57	4-5	4
УНОУ-1+ ОГС	19,3	3,5	5	89,67	-3,66	5	5
УНОУ-1 + ПО	15,7	21,5	4	16,3	81,16	3	3
ВГЛ	18,3	8,5	5	81,2	6,13	5	5

Биотестирование образцов показало, что практически все композиции мелиорантов пригодны к использованию. Ограничения по использованию имеют УНОУ -1 и УНОУ 1 + ПО (3 степень токсичности) (таблица 4).

В лабораторных условиях с контролируемым световым и термическим режимом был заложен почвенный вегетационный опыт. В качестве посадочного материала использовался горох посевной *Pisum sativum* L., сорт Труженик.

Предварительно проводилось выравнивание почвенных свойств, просеивание почвы, подготовка пластиковых ёмкостей (устройство дренажа и полива), добавление мелиорантов в почву и перемешивание, отбор проб субстрата для определения общей влагоемкости, набивка ёмкостей и их взвешивание. Выбор доз определялся на основе агрохимического анализа почв, результатов модельного эксперимента и данных биотестирования

В ёмкости высаживались по 15 семян гороха, после прорастания оставлялось по 10 растений. Полив проводился ежедневно по массе – для поддержания постоянной влажности 70 % от общей влагоемкости (29,5 % от абсолютно сухой массы почвы). Длительность опыта - 2 месяца.

Оценку эффективности мелиорантов проводили по выносу радионуклидов из почвы растениями, который определялся по разности содержания радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  в начальном субстрате и в субстрате после эксперимента (за вычетом влажности и массы корней). Данные эксперимента приведены на рисунке 3.

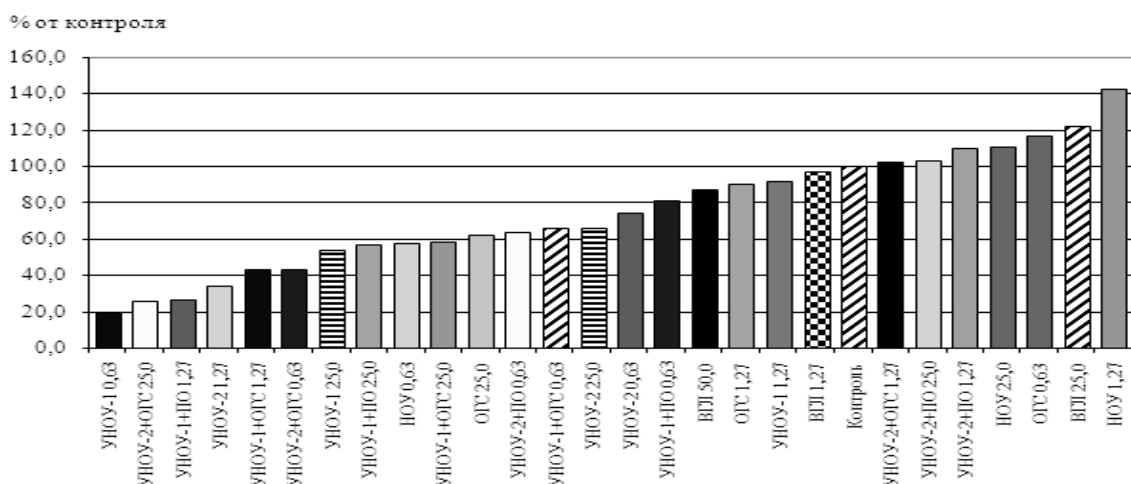


Рисунок 3 - Вынос цезия-137 из почвы растениями гороха (в % от контроля)

Среди мелиорантов на основе органических отходов стабильное действие оказало внесение УНОУ-1+ОГС – снижение на 34-56 %. Применения УНОУ-1, УНОУ-2 УНОУ-1+НО также положительно влияет на закрепление радионуклидов в почве, хотя не так четко - от 9 до 90 %.

Влияние выдержанного гидролизного лигнина, НОУ, УНОУ-2+ОГС имеет минимум при средних концентрациях – значения не отличаются от контроля, что может быть связано с кислой реакцией лигнина и НОУ, фиксация в почве наблюдается при крайних значениях. Наиболее это выражено у УНОУ-2+ОГС переход цезия снижается на 57-74 %.

В целом действие разработанных мелиорантов на основе органических отходов основано на специфической сорбции органического вещества, эффекта «разбавления» за счет увеличения биомассы и влияния на динамику обменного калия в субстрате.

Оценка возможной токсичности модифицированной мелиорантами почвы и эффекта взаимодействия почвы с растениями проводилась по морфометрическим характеристикам (длина стебля, флуктуирующая асимметрия листовой пластинки, морфологические нарушения) гороха посевного, который широко применяется в качестве тест-организма. Результаты исследований дают возможность получить интегральную оценку качества исследованных субстратов.

В соответствие с таблицей 5, все новые нетрадиционные удобрения, органические и неорганические добавки со степенью токсичности III (средняя) не рекомендуются к использованию в качестве мелиорантов.

Таблица 5 - Влияние почвенных мелиорантов на морфологические и физиологические параметры растений гороха

Мелиорант	Доза внесения, г/кг почвы	Длина стебля, см	ИТФ <sub>1</sub>	Кол-во аномалий, шт	ИТФ <sub>2</sub>	ФА	ИТФ <sub>3</sub>	ИТФ <sub>ср</sub>	Степень токсичности
Контроль	-	26,5	1,0	0,6	1,0	0,029			
НОУ	0,63	24,7	0,932	0,9	0,67	0,020	1,45	1,02	V
НОУ	1,27	28,4	1,072	1,6	0,38	0,138	0,21	0,55	III

НОУ	25,0	28,1	1,060	1,7	0,35	0,139	0,21	0,54	III
ВГЛ	1,27	28,5	1,075	1,3	0,46	0,145	0,20	0,58	III
ВГЛ	25,0	25,8	0,974	1,1	0,54	0,142	0,20	0,57	III
ВГЛ	50,0	24,1	1,098	1,4	0,43	0,144	0,20	0,58	III
ОГС	0,63	23,1	1,864	0,7	0,86	0,157	0,18	0,63	V
ОГС	1,27	27,1	1,955	0,7	0,86	0,141	0,21	0,68	V
ОГС	25,0	27,3	1,992	0,8	0,75	0,147	0,19	0,64	V
УНОУ-1	0,63	24,5	0,925	0,5	1,2	0,016	1,81	1,31	VI
УНОУ-1	1,27	24,4	0,920	1,25	0,48	0,145	0,20	0,53	III
УНОУ-1	25	25,7	0,970	0,5	1,2	0,005	5,80	2,66	VI
УНОУ-2	0,63	22,2	0,838	1,2	0,43	0,002	14,5	5,26	VI
УНОУ-2	1,27	24,6	0,928	1,4	0,35	0,001	72,5	24,59	VI
УНОУ-2	25,0	27	1,019	1,3	0,46	0,014	2,07	1,18	VI
УНОУ-1+ПО	0,63	24,8	0,936	1,4	0,43	0,157	0,18	0,52	III
УНОУ-1+ПО	1,27	28,1	1,060	1,1	0,54	0,022	1,32	0,97	V
УНОУ-1+ПО	25,0	22,8	0,860	0,7	0,86	0,026	1,12	0,95	V
УНОУ-2+ПО	0,63	25,6	0,966	0,7	0,86	0,016	1,81	1,21	VI
УНОУ-2+ПО	1,27	24,2	0,913	0,7	0,86	0,005	5,80	2,52	VI
УНОУ-2+ПО	25,0	28,6	1,079	1,2	0,5	0,290	0,10	0,56	III
УНОУ-1+ОГС	0,63	29,1	1,098	0,8	0,75	0,004	7,25	3,03	VI
УНОУ-1+ОГС	1,27	27,1	1,023	0,6	1	0,161	0,18	0,73	IV
УНОУ-1+ОГС	25	27,3	1,030	1,8	0,33	0,007	4,14	1,83	VI
УНОУ-2+ОГС	0,63	32,1	1,211	0,8	0,75	0,018	1,60	1,19	VI
УНОУ-2+ОГС	1,27	31,9	1,204	1,3	0,46	0,002	14,50	5,39	VI
УНОУ-2+ОГС	25,0	28,4	1,072	1,5	0,4	0,001	72,50	24,66	VI

Если же морфологические и физиологические реакции растений на субстраты соответствуют норме или обнаруживается стимулирующий эффект, использование этих мелиорантов в данных дозах – целесообразно.

Так, результаты тестирования показали, что использование гидролизного лигнина в качестве субстрата не дает положительного результата. Хороший результат в эксперименте показали такие мелиоранты, как УНОУ-2 и УНОУ-2+ОГС, кроме того, для большинства исследованных субстратов имеются дозы, в которых они благоприятно влияют на рост и развитие растений гороха. Так, например, для УНОУ-1 - это доза 25 мг/кг, для НОУ - 0,63 г/кг.

### Выводы

В результате проведения модельного эксперимента определены оптимальные интервалы доз внесения мелиорантов для изучения их действия на поступление радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в растения.

Методами биотестирования оценена токсичность собственно мелиорантов и модифицированной ими почвы до и после вегетационных экспериментов. Так класс опасности разработанных экспериментальных образцов мелиорантов как отходов составлял 3-4, а при взаимодействии с почвой и в ходе вегетационных опытов в оптимальных дозах снизился до - до 4-5.

Проведены лабораторные эксперименты по исследованию влияния мелиорантов на переход радионуклидов цезия из почвы в растения. Максимальный эффект снижения наблюдался при внесении отдельных доз УНОУ-2+ОГС и УНОУ-1+ОГС. Сорбционное действие мелиорантов УНОУ-1, УНОУ-2 УНОУ-1+ПО существенно не отличается от контроля..

В целом действие разработанных мелиорантов основано на сорбции органическим веществам, эффекте «разбавления» за счет увеличения биомассы и влияния на динамику обменного калия в субстрате.

### Список литературы

1 20 лет Чернобыльской катастрофы. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. Российский национальный доклад. - М, 2006.- 92с.

2 Руководство по ведению лесного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения от аварии на Чернобыльской АЭС (на период 1997-2000 гг.).- М.: Федеральная служба лесного хозяйства России, 1997. – 111 с.

3 Сысоева, А.А. Экспериментальное исследование и моделирование процессов, определяющих подвижность Sr-90 и Cs-137 в системе «почва-растение»: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.01 / Сысоева Анастасия Анатольевна. – Обнинск, 2004.

4 Лурье, А.А. Сельскохозяйственная радиология и радиоэкология / А.А. Лурье. - М.: МСХА, 1999. – 219 с.

5 Прохоров, В.М. Миграция радиоактивных загрязнений в почвах /В.М. Прохоров.- М.: Энергоиздат, 1981.- 98с.

6 Воробьев, Г.Т. Почвенная концепция преодоления последствий радиоактивных загрязнений /Г.Т. Воробьев, З.Н. Маркина, Н.А. Кошелев Е.П. Просянкин //Роль творческого наследия академика ВАСХНИЛ В.М. Кличковского в решении современных проблем сельскохозяйственной радиоэкологии.- М., 2001.-С.114-120.

7 Воробьев, Г.Т. Почвенное плодородие и радионуклиды /Г.Т. Воробьев, Н.Н. Чумаченко, З.П. Маркина, А.А. Курчанова.- М.:Природа, 2002.-236с.

8 Сельскохозяйственная радиоэкология / Р.М. Алексахин, А.В. Васильев, В.Г. Дикарев и др.: под ред. Алексахина Р.М., Корнеева Н.А. - М.: Экология, 1992.-400с.

9 Лурье, А.А. Сельскохозяйственная радиология и радиоэкология / А.А. Лурье. - М.: МСХА, 1999. – 219 с.

10 Федорец, Н.Г. Повышение плодородия почв в лесных питомниках путем внесения отходов ЦБП / Н.Г. Федорец, Л.Г. Пилюгина, Р.В. Леонтьева, Г.Н. Кураева // Применение отходов ЦБП в лесных питомниках. – Петрозаводск: Карел. Науч. Центр АН СССР, 1990. – С. 5-14.

11 Тикавый, В.А. Органические удобрения на основе гидролизного лигнина и их использование в сельском хозяйстве / В.А. Тикавый, А.Г. Осинский, В.В.Гребень, И.А. Юшкевич. - Минск: БелНИИТИ, 1983. – 40 с.

12 Нурмухаметов, Н.М. Влияние форм, доз и способов внесения удобрений на биологическую активность почвы / Н.М. Нурмухаметов, М.Х. Хамидуллин, Р.М. Нугманов //Агротехника и биология полевых культур.- Уфа, 1977.-С.73-80.